

学校编码: 10384

密级_____

学号: 32420131152282

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

超临界二氧化碳布雷顿循环系统稳态建模 与分析

Supercritical carbon dioxide Brayton cycle system steady
state modeling and analysis

梁墩煌

指导教师姓名: 郭奇勋 副教授

张尧立 助理教授

专 业 名 称: 核工程与材料

论文提交日期: 2016 年 4 月

论文答辩日期: 2016 年 5 月

2016 年 5 月

超临界二氧化碳布雷顿循环系统稳态建模与分析

梁墩煌

指导教师

郭奇勋

副教授

张尧立

助理教授

厦门大学

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

超临界二氧化碳 (Supercritical carbon dioxide, S-CO₂) 布雷顿循环在中等温度条件下 (450-700℃) 循环热效率高于蒸汽朗肯循环和氦气布雷顿循环, 并且其结构紧凑、受外部环境约束较小, 是第四代反应堆系统推荐使用的新一代能量转换系统。进入 21 世纪以来, 各国对该技术展开了一系列研究。

本文开发了 S-CO₂ 布雷顿循环稳态模拟计算程序, 用于分析 S-CO₂ 布雷顿循环回热及再压缩循环的运行性能。计算程序核心模块采用 Fortran 语言构建底层计算模型, 调用 Python 语言 Numpy 库完成数值求解, 程序界面基于 Cocoa 框架, 使用 Objective-C 语言编写。计算程序分别对 S-CO₂ 布雷顿循环所涉及的重要部件: 压缩机、透平、换热器等进行建模, S-CO₂ 物性库采用 NIST 提供的标准数据库。

利用程序对 S-CO₂ 布雷顿循环设计工况运行参数进行优化分析。包括: 分析压缩机出口压力、压比及换热器压损、换热能力、热源温度以及排热温度等循环参数对循环热效率的影响。计算结果表明, 压缩机出口压力及压比均存在最优值, 换热器压损会严重影响循环热效率, 并影响循环再压缩份额。换热器的换热能力对系统热效率有着显著影响, 当换热能力超过一定值后, 增加系统压力并不能提高系统热效率。与热源温度相比, 排热温度对系统热效率影响更明显。当换热器换热能力超过一定值后, 排热温度存在一个最佳值。

根据设计运行工况分析的结果, 以 10MW S-CO₂ 布雷顿再压缩循环为研究目标, 针对水冷和空冷两种情况, 进行设备选型、数值建模及偏离设计工况运行特性分析。研究循环系统对扰动的响应, 包括: 压缩机入口温度变化, 压缩机入口压力变化及透平入口温度变化。结果表明, 当系统参数发生扰动变化时, S-CO₂ 布雷顿再压缩循环可以通过调整再压缩份额及透平转速等运行参数, 以得到循环效率最优。水冷和空冷两种设计分别有着自己独特的优势, 水冷循环回路循环效率高, 结构紧凑; 空冷循环回路适用范围广, 不需要循环冷却水, 可建设在内陆等冷却水贫乏地区。同时空冷循环在扰动下, 偏离设计工况运行下性能要优于水冷循环, 循环热效率损失较小。

关键词：超临界二氧化碳 布雷顿循环 热效率 10MW 回路

厦门大学博士论文摘要库

Abstract

The efficiency of the supercritical carbon dioxide (S-CO₂) power cycles are higher than steam Rankine cycle and helium Brayton cycle in the mild turbine inlet temperature region, and the compact structure and the less restraint of the environment make the S-CO₂ a promising alternative power conversion system for next-generation nuclear reactors. Since the 21st century, many countries launched a series of research with the S-CO₂ cycle technology.

A S-CO₂ Brayton cycle steady-state simulation program is developed in this paper, which is used to analyze the performance of recuperated and recompression cycle configurations. The modeling framework of the calculation program core module is in Fortran and the program uses the NumPy library of Python to complete the numerical calculation. The program interface is based on the Cocoa framework, written in Objective-C. The models of the main components in S-CO₂ Brayton cycle are developed in the program in which the CO₂ fluid properties adopted the Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database distributed by NIST.

Using the S-CO₂ Brayton cycle model, the design-point operation parameter of the S-CO₂ Brayton cycle was analyzed, including the outlet pressure and the pressure ratio of compression, the pressure drop and the conductance of heat exchanger, temperature of heat source and heat rejection temperature. The results show that both the outlet pressure and the pressure ratio of compression have an optimization value, and the pressure drop of the heat exchanger effect the efficiency and the recompression fraction of S-CO₂ Brayton cycle seriously. When the conductance exceeds some threshold value, enhancing pressure cannot improve the thermal efficiency. Compared to the temperature of heat source, heat rejection temperature affects the cycle thermal efficiency more significantly. A best heat rejection temperature existed when the conductance of HXs is big enough.

According to the parameter optimization results and in order to study the 10MW S-CO₂ Brayton recompression cycle, the equipment selection, numerical modeling and off-design operation condition analysis have proceeded under the water-cooled and air-cooled condition. The performance of those two circulation loops under the off-design condition was analyzed and compared by the program, and the system response was also studied. The parameter in off-design includes the turbine inlet temperature, the

compressor inlet temperature and pressure. The results show that both the two loops are able to achieve the highest thermal efficiency by adjusting the operation, such as the recompression fraction and the turbine shaft speed, under the off-design condition. Those two kinds loop have their own advantage respectively. The advantage of water-cooled loop is the high efficiency and compact structure. The advantage of air-cooled loop is the wide range of application, which can be applied in the aridity area. The performance of the air-cooled loop is better the water-cooled loop, in which the cycle thermal efficiency losses is less.

Keywords: Supercritical Carbon Dioxide; Brayton Cycle; Thermal Efficiency; 10MW Loop;

目 录

摘 要.....	I
Abstract	III
第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 S-CO ₂ 布雷顿循环基本原理.....	2
1.3 S-CO ₂ 布雷顿循环优势	4
1.4 S-CO ₂ 布雷顿循环研究现状.....	6
1.4.1 研究历史.....	6
1.4.2 现阶段发展.....	8
1.4.3 国内研究.....	9
1.5 研究意义	10
第二章 S-CO ₂ 布雷顿循环计算模拟程序介绍	11
2.1 设计工况循环建模方法	11
2.1.1 透平机械模型.....	11
2.1.2 换热器模型.....	12
2.1.3 循环模型.....	13
2.1.4 工质物性参数.....	15
2.2 偏离设计工况循环建模方法	16
2.2.1 组件模型接口.....	16
2.2.2 印刷电路板换热器（PCHE）换热器模型	17
2.2.3 SANDIA 国家实验室 S-CO ₂ 压缩机模型	21

2.2.4 透平模型.....	24
2.2.5 偏离设计工况循环模型.....	26
2.3 程序界面	29
第三章 S-CO₂ 设计工况热工分析.....	38
3.1 压缩机出口压力对热效率的影响	38
3.2 压缩机压比影响	41
3.3 换热器压损影响	42
3.4 换热器换热能力对热效率的影响	44
3.5 最高温度对热效率的影响	45
3.6 排热温度对热效率的影响	46
第四章 S-CO₂ 布雷顿循环 10MW 回路.....	48
4.1 设计 10MW 循环回路意义.....	48
4.2 循环回路设备及运行参数	49
4.2.1 动力涡轮设备	50
4.2.2 换热器设计.....	53
4.2.3 排热系统.....	55
4.2.4 辅助设备.....	56
4.3 循环回路偏离设计工况性能分析	57
4.3.1 透平入口温度影响.....	58
4.3.2 压缩机入口压力影响.....	61
4.3.3 压缩机入口温度影响.....	64
第五章 结论及展望	68
5.1 S-CO ₂ 布雷顿循环热工分析.....	68

5.2 10MW 超临界二氧化碳循环回路.....	69
5.3 未来工作展望	70
参考文献	71

厦门大学博士论文摘要库

Table of Contents

Abstract in Chinese.....	I
Abstract in English	III
Chaper1 Introduction	1
1.1 background	1
1.2 the characteristics of S-CO ₂ Brayton cycle	2
1.3 the advantages of S-CO ₂ Brayton cycle	4
1.4 Background and status of S-CO ₂ Brayton cycle research	7
1.4.1 Research history of S-CO ₂ Brayton cycle	7
1.4.2 Research status of S-CO ₂ Brayton cycle	8
1.4.3 Research status in China	9
1.5 significance of the S-CO ₂ research	10
Chaper.2 S-CO₂ Brayton cycle simulation program	12
2.1 Design-Point Modeling Methodology	12
2.1.1 Turbomachinery model	12
2.1.2 heat exchangers model	13
2.1.3 cycle model	14
2.1.4 fluid properties	15
2.2 Off-Design Modeling Methodology	17
2.2.1 Component Model Interfaces	17
2.2.2 Printed Circuit Heat Exchanger model	18
2.2.3 Sandia National Laboratory SCO ₂ Compressor model	22
2.2.4 Turbine model	26
2.2.5 Cycle Model	27
2.3 program interface	31
Chapter.3 S-CO₂ cycle Design-Point Analysis	40
3.1 Effect of compressor outlet pressure	40
3.2 Effect of compressor pressure ratio	43
3.3 Effect of heat exchanger pressure drop	44
3.4 effect of heat exchanger conductance	46
3.5 effect of turbine inlet temperature	47
3.6 effect of the reject temperature	48
Chapter.4 S-CO₂ Brayton cycle 10MW loop	50

4.1 motivation of 10MW loop design	50
4.2 loop component and operation parameter	51
4.2.1 turbo-alternator-compressor design	52
4.2.2 heat exchanger design	55
4.2.3 heat rejection system design	57
4.2.4 auxiliary equipment	58
4.3 S-CO₂ cycle loop Off-Design Analysis	59
4.3.1 effect of turbine inlet temperature	60
4.3.2 effect of compressor inlet pressure	64
4.3.3 effect of compressor inlet temperature	67
Chapter.5 Conclusions and prospect	71
5.1 S-CO₂ Brayton Cycle Design-Point Considerations	71
5.2 S-CO₂ Cycle 10MW Loop Off-Design Considerations	72
5.3 Recommendations for Further Study	73
Reference	74

第一章 绪论

1.1 研究背景

降低核电站发电成本是更好利用核能的重要措施之一。在能源需求日益增长的当下，新型反应堆越来越受到关注。在 21 世纪早期，多个国家共同研发第四代核反应堆（Gen IV），提出了六种候选堆型，分别为钠冷快堆（SFR）、铅冷快堆（LFR）、气冷快堆（GFR）、超临界水堆（SCWR）、超高温气冷堆（VHTR）及熔盐堆（MSR）^[1]。为了达到更高的循环效率，第四代核反应堆的运行温度要高于常规压水堆，通常为 500℃-900℃，而常规压水堆运行温度约为 300℃。更高的反应堆出口温度会提高动力转换系统中透平的入口温度，由此可提高循环热效率。

第四代核能系统提高了反应堆出口温度及循环热效率，目前反应堆热效率较低的问题得以解决。更高的堆芯出口温度可采用比传统蒸气朗肯循环更先进的能量转换循环。目前，超临界二氧化碳（supercritical carbon dioxide, S-CO₂）布雷顿循环受到越来越多的关注与研究。除超临界水堆外，其余堆型的能量转换系统均可采用 S-CO₂ 布雷顿循环^[2]，其中铅冷快堆和钠冷快堆的首选能量转换系统就是 S-CO₂ 布雷顿循环^[3]。主要原因就在于 S-CO₂ 布雷顿循环在第四代核反应堆系统的运行温度区间内可提供较高的循环热效率，与结构材料有着更好的相容性^[4]，可提高动力转换系统的安全性及可靠性。

氦气布雷顿循环是另一种高效的能量转换方式，但是为了达到较为理想的高循环效率（约 45-48%），反应堆堆芯出口温度需达到 900℃左右的高温。南非的 ESKOM PBMR 项目所采用的就是氦气布雷顿循环^[5]，但当电站容量因子设置较高时，反应堆出口温度很难达到所需高温，因此氦气布雷顿循环的实现还需一段时间的发展。同时，氦气布雷顿循环所需的高温环境对反应堆结构材料也是一个严峻挑战。对于适用于第四代核反应堆的能量转换系统，最为理想的能量转换系统应在 500℃-700℃的运行区间内能达到较高的循环热效率，这样可衔接高温反应堆与低温反应堆，扩展核动力设备的适用范围。而 S-CO₂ 布雷顿循环在这样一个温度区间内，其热效率远远高于水蒸气朗肯循环和氦气布雷顿循环，具有明显的比较优势。

1.2 S-CO₂布雷顿循环基本原理

超临界状态下的 CO₂ 工质用于核反应堆系统内通常采用布雷顿热力循环模式，简单布雷顿循环通常包括以下四个过程，绝热压缩（过程 1-2）、定压加热（过程 2-3）、绝热膨胀（过程 3-4）、定压放热（过程 4-1）4 个基本过程，循环中温度与比熵变化过程如图 1.1 所示。

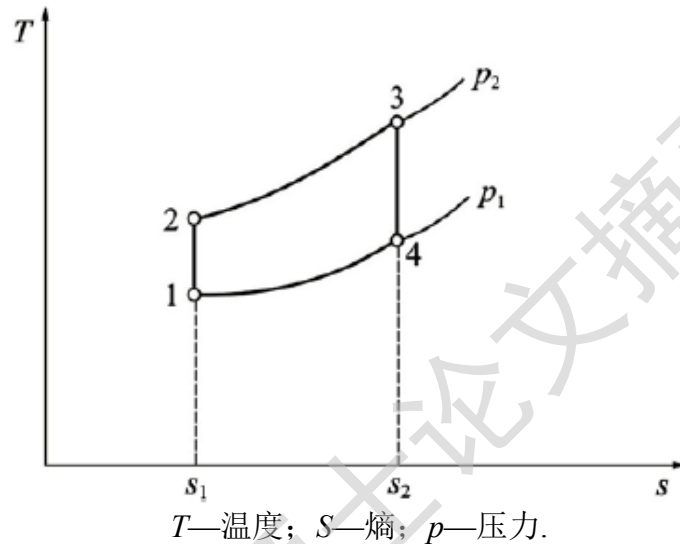


图 1.1 布雷顿循环温熵图

Fig. 1.1 Brayton cycle temperature-entropy diagram

简单 S-CO₂ 布雷顿系统流程如图 1.2 所示，系统主要部件有压缩机、回热器、透平机、冷却器和反应堆热源等^[6]。S-CO₂ 布雷顿循环能量转换系统可用于反应堆系统内直接循环与间接循环系统，直接循环系统内由反应堆堆芯直接供热，间接循环系统内热源为反应堆一、二回路间的主换热器。低温低压的 CO₂ 工质在压缩机绝热压缩，再通过回热器高温侧预热回收热量，然后进入反应堆热源，定压吸热后进入透平机膨胀做功，乏气通过回热器低温侧进行冷却后，再进入冷却器进行冷却，最后进入压缩机形成完整闭式循环。

后研究发现，如图 1.2 的简单 S-CO₂ 布雷顿循环中，回热器高温侧与低温侧工质比热容有较大差值，会使回热器运行出现“夹点”问题，影响循环热效率。因此对简单 S-CO₂ 布雷顿循环进行改进，加入分流、再压缩等热力过程^[7]，可明显提高循环热效率。S-CO₂ 布雷顿循环中最有发展前景的是再压缩循环^[8, 9]，相比于简单布雷顿循环，再压缩布雷顿循环在预冷器之前，将一部分 CO₂ 分流至再

压缩压缩机，分流的 CO_2 经再压缩压缩机压缩后，在高温回热器与低温回热器之间与主流汇合。由于在临界点附近， CO_2 性质变化剧烈，低温回热器低温侧流体比热容高于高温侧比热容。旁通回路的作用就是通过减少低温回热器低温侧流体质量，来平衡两边的比热容率。 S-CO_2 再压缩布雷顿循环循环布置如图 1.3 所示，温熵图如图 1.4。

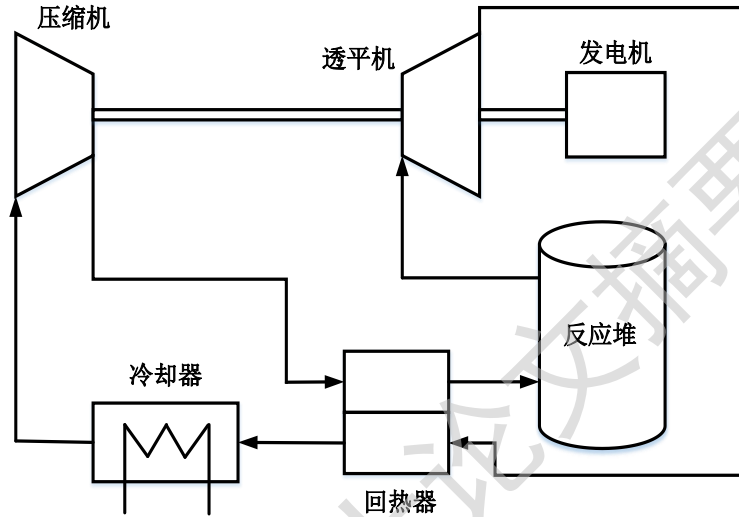
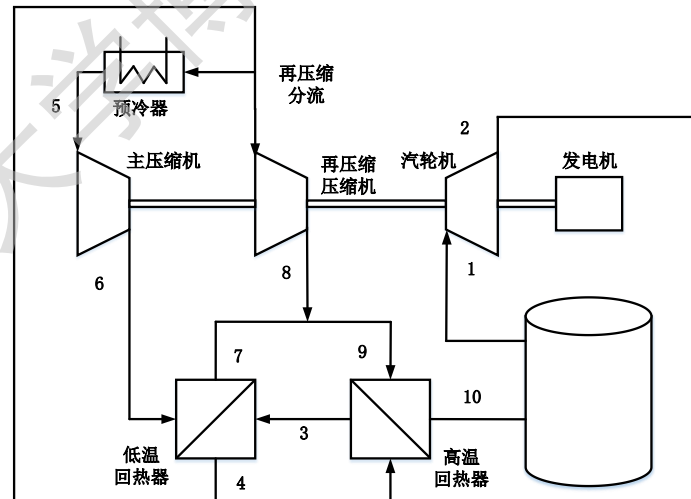


图 1.2 简单布雷顿循环流程图

Fig. 1.2 Simple Brayton cycle flow chart

图 1.3 S-CO_2 闭式再压缩布雷顿循环系统Fig. 1.3 S-CO_2 closed recompression Brayton cycle

CO_2 工质首先进入透平做功（过程 1 至 2），做功后的 CO_2 进入高温回热器进行定压放热（过程 2 至 3），加热低温侧工质，然后进入低温回热器（过程 3 至

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.